

**А.А. НЕГАДАЙЛОВ**, здобувач, Чернівецький факультет НТУ «ХПІ»,  
**В.П. ШАПОРЕВ**, докт. техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»

## **АНАЛІЗ ВПЛИВУ ДІАМЕТРА КУСКОВОГО МАТЕРІАЛУ НА ОТРИМАННЯ ВАПНА ВИСОКОЇ ЯКОСТІ В ШАХТНІЙ ПЕЧІ**

Проведений аналіз сучасного стану моделювання технології випалювання вапняку в шахтних печах. З метою отримання високоякісного вапна запропоновано проводити загрузку кускового матеріалу в шахтну піч диференційовано по діаметру кусків.

The analysis of the modern state of design of technology of burning of limestone is conducted in shaft furnace. With the purpose of receipt high-quality to exterminate it is suggested to conduct the load of lump material in a shaft furnace to divide on the diameter of pieces.

Сучасні виробництва (металургійні, содові, цукрові, будівельних матеріалів) потребують високоякісне вапно, що відповідає жорстким умовам по вмісту оксидів кальцію та магнію, а також по часу гідратації [1, 2, 3].

Вапно не може транспортуватися на великі відстані і тому будівництво вапновипалювальних ділянок здійснюється у безпосередній близькості до користувача.

На сьогоднішній день найбільші об'єми виробництва вапна належать шахтним печам.

В нашій країні більшість з них були спроектовані для роботи на твердому паливі, але пізніше були переведені ні газове отоплення.

Основними перевагами шахтних печей на газі є низька питома витрата палива та низька вартість.

В Україні переважно експлуатуються шахтні печі зразка 1960 – 1970 років.

Ці печі не дають можливості отримувати високоякісне вапно, тобто вміст оксидів кальцію та магнію в продукті менший ніж 80 %, ступінь дисоціації карбонатної сировини менше 90 %, час гідратації вапна перевищує 5 хв.

Подібна ситуація вимагає суттєвої реконструкції шахтних печей, яка повинна здійснюватися на основі досліджень по розробці ефективного обладнання та оптимальних умов його роботи.

Сучасні дослідження направлені на створення математичних моделей, в яких враховується аеродинаміка пористого середовища, механізми руху матеріалу та газу, кінетика дисоціації кускового вапняку і подальше впровадження моделі на конкретних виробництвах.

Основною проблемою аеродинаміки кускового шару циліндричних шахтних печей [1, 4] є переважно кільцевий режим течії горячих газів, тобто в зоні випалювання найбільші швидкості газового потоку встановлюються поблизу стінок печі, центральна частина печі, в якій швидкості теплоносія в 1,5 – 2 рази нижча, відчуває недостачу тепла.

Це приводить до нерівномірного випалювання карбонатного матеріалу та спіканню кусків поблизу стінок з можливою приваркою їх до футеровки.

Поряд з нерівномірністю розподілу газового потоку по перерізу, має місце нерівномірність розподілу швидкості руху матеріалу.

Згідно [4] фронт швидкості руху матеріалу в шахтних печах циліндричного типу має еліптичну форму з вершиною в центральній частині печі, при цьому швидкість руху матеріалу в центрі може бути на 20 – 30 % більшою ніж біля стінок.

Така ситуація приводить до необхідності підвищувати температуру випалювання до 1100 – 1200 °C і навіть більше.

Зниження температури приводить до недопалу крупних кусків матеріалу в центральній частині, а підвищення температури приводить до перепалу малих кусків та можливому їх спіканню поблизу стінок печі.

Все вище згадане знижує якість вапна і накладає жорсткі умови на фракційний склад, по діаметру, кускового матеріалу (40 – 120 мм.).

Всі фракції вапняку діаметром менше ніж 40 мм. ідуть у відвали.

Майже всі сучасні теоретичні та експериментальні дослідження направлені на вирівнювання температури та швидкості руху матеріалу по діаметру печі.

Фірма MAERZ [5] розробила конструкцію печі з прямоточним рухом газів та карбонатів, що дає можливість найбільш гарячим газам віддавати тепло відносно холодним кускам матеріалу, при цьому температура кусків матеріалу не перевищує 1300 °C [6].

Авторами [1, 4, 7, 8] запропонована модель прямоточно-протиточного руху матеріалу і газу, яка разом з механізмом розгрузки системи Антонова дозволяє значно вирівнювати швидкість руху матеріалу по діаметру печі та більш повно використовувати тепло відходящих газів.

Авторами [6] пропонується двоярусна система периферійних горілочних пристроїв, що дає можливість дещо вирівняти температуру випалювання по діаметру печі.

Таким чином об'єктивно неможливо вирівняти температуру по діаметру шахтних печей, що працюють на газі.

Всі методи, що направлені для вирішення цієї проблеми, по-перше, не вирішують її до кінця, по-друге, приводять до значних ускладнень конструкції печі, по-третє, накладають жорсткі границі на температурний інтервал роботи печей, а також на діаметри кусків вапняку, що загрузаються у піч.

Нами пропонується вирішувати проблеми недопалу, перепалу, або спікання матеріалу, що випалюється, за рахунок диференційованої загрузки вапняку по діаметру печі.

Якщо в центральну частину печі, де температура нижче ніж у стінок, а також час перебування кускового матеріалу в зоні випалювання найменший, не загрузати матеріал більше певного діаметра, то це дозволить, по-перше, знизити максимальні температури роботи печей, що відповідно приведе до зменшення витрати палива, по-друге, дасть можливість загрузати в піч матеріал діаметром менше ніж 40 мм, не ризикуючи отримати перепалене вапно, або спікання кускового матеріалу.

Необхідні діаметри матеріалу, що загрузаються у піч, можна отримати з рішення загальної багатомірної математичної моделі руху газів та матеріалу, а також моделі теплопереносу в шарі кускового матеріалу та моделі випалювання окремої гранули.

Математична модель включає наступні головні рівняння [6]:

Рівняння неперервності:

- для матеріалу

$$\frac{\partial}{\partial t}[r_m(1-e)] + \text{div}[r_m(1-e)\mathbf{v}_m] = Q_m, \quad (1)$$

- для газу

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_g e) + \text{div}(r_g e \mathbf{v}_g) = Q_g. \quad (2)$$

Рівняння руху відповідно для матеріалу та газу:

$$r_m(1-e)\frac{d}{dt}\left(\frac{1-e_p}{1-e}\mathbf{v}_m\right)=r_m(1-e)\mathbf{g}+div\left[(1-e_p)\mathbf{\Sigma}\right]+\mathbf{R}, \quad (3)$$

$$r_g e \frac{d}{dt}\left(\frac{e_p \mathbf{v}_g}{e}\right)=r_g e^* \mathbf{g}-grad(P)+\mathbf{R}. \quad (4)$$

Рівняння теплообміну:  
для матеріалу

$$r_m(1-e)c_m \frac{dT_m}{dt}=-a_v(T_g-T_m)+q_m, \quad (5)$$

для газу

$$r_g c_g e \frac{dT_g}{dt}=a_v(T_g-T_m)+q_g. \quad (6)$$

Рівняння процесу дисоціації вапняку:

$$\frac{dx}{dt}=\frac{3l}{r_m H_L R_k^2} * \frac{(1-x)^{1/3}}{1-(1-x)^{1/3}}(T_0-T_i). \quad (7)$$

$r$  – густина;  $\varepsilon$  та  $\varepsilon_p$  – пористість та проникливість шару;  $\mathbf{v}$  – швидкість;  $Q$  – джерела та стоки маси;  $q$  – джерела тепла;  $t$  – час;  $\mathbf{R}$  – сила опору шару матеріалу руху газу;  $P$  – тиск;  $l, C$  – теплопровідність, теплоємність, відповідно;  $T$  – температура;  $\mathbf{\Sigma}$  – тензор напруги;  $\mathbf{g}$  – прискорення сили гравітації;  $a$  – коефіцієнт конвективного теплообміну;  $H_L$  – теплота реакції декарбонізації;  $x$  – коефіцієнт дисоціації карбонату;  $T_0$  – температура поверхні гранули;  $T_i$  – температура фронту реакції;  $R_k$  – радіус гранули; індекси:  $g, m$  – газ та матеріал.

Режим роботи більшості шахтних печей близький до стаціонарного [7]. Тому в рівняннях (1, 8) можна праві частини прирівняти до нуля.

Крім того течія газів в пористому середовищі для руху потоку з врахуванням імпульсів переміщення, що створюються під впливом зсувних напруг

в потоці газу, описується рівняннями Брінкмана [2, 4], які є розширеним законом Дарсі.

$$-m(\nabla \mathbf{v}_g^{\mathbf{r}} + (\nabla \mathbf{v}_g^{\mathbf{r}})^T) - \frac{m}{e_p} + grad(P) = \mathbf{R}, \quad (8)$$

$$\nabla \mathbf{v}_g^{\mathbf{I}} = 0, \quad (9)$$

де  $\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості.

Таким чином рідшаючи сумісно рівняння (1) – (8) можна визначити діаметри кусків матеріалу, що загрузається в піч, які дозволяють отримувати вапно високої якості без недопалу великих кусків та перепалу малих.

Модель, що пропонується передбачає вдосконалення загрузочного пристрою шахтної печі.

**Список літератури:** 1. Голубев В.О. Исследование процесса обжига металлургического известняка в шахтной печи / В.О. Голубев // Записки горного института. – 2006. – Т. 169. – С. 101 – 103. 2. Табуничиков Н.П. Производство извести / Н.П. Табуничиков. – М: Химия, 1974. – 239 с. 3. Ткач Г.А. Производство соды по малоотходной технологии / Г.А. Ткач, В.П. Шапорев, В.М. Титов. – Харьков: ХГПУ, 1998. – 429 с. 4. Жигач С.И. Математические модели в практике проектирования и оптимизации известеобжигательных шахтных печей / [С.И. Жигач, В.Е. Никольский, И.Н. Белоглазов, В.О. Голубев] // Черные металлы. – 2006. – № июль-август. – С. 28 – 33. 5. Maerz The Parallel Flow Regenerative Lime Kiln (PR-Kiln) / Maerz // Zement – Kalk – Gypsum. – 1965. – 394 p. 6. Gordon Y.M. New Technology and shaft furnace for high qualiti metallurgical lime production / [Y.M. Gordon, M.E. Blank, V.V. Madison, P.R. Abovian] // Proceedings of Asia Steel International Conference, 9 – 12 Apr. 2003. – Jamshedpur, India, 2003. – Vol. 1. – P. 1.b.1.1 – 1.b.1.6. 7. Белоглазов И.Н. Математическое моделирование и численный анализ шахтной печи / И.Н. Белоглазов, В.О. Голубев // Цветные металлы. – 2005. – № 7. – С. 31 – 35. 8. Белоглазов И.Н. Модель технологии обжига известняка в шахтной печи / И.Н. Белоглазов, В.О. Голубев, О.В. Зиязитдинова // Записки горного института. – 2006. – Т. 169. – С. 71 – 73.

Поступила в редколлегию 19.03.10